

Titulació:

Grado en Ingeniería en Tecnologías Aeroespaciales (GrETA)

Escuela:

Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa
(ESEIAAT)

Alumno:

Borja Martínez Martínez

Titulo trabajo final de Grado:

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A RASANTE DE LA INTERFACE
ENTRE CHAPAS DE COMPOSITE (FRP) Y HORMIGÓN

Director:

Ernest Bernat Masó

Convocatoria de entrega del TFG:

Ordinaria; Cuatrimestre de primavera 2018-2019

Fecha de entrega:

07 de junio del 2019

Contenido:

Documento 1. Memoria



Trabajo Final de Grado

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A RASANTE DE LA INTERFACE ENTRE CHAPAS DE COMPOSITE (FRP) Y HORMIGÓN

Memoria

Autor: Borja Martínez Martínez

Director: Ernest Bernat Masó

GRETA Q2 2018-2019

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que han contribuido a la reacción de este trabajo.

A mi familia que a pesar de la distancia siempre me han apoyado y ayudado en lo que podían.

A los profesores Ernes Bernat y Lluís Gil por permitirme realizar este trabajo y estar trabajando en el laboratorio durante estos meses, donde he podido estar en contacto con numerosas personas y proyectos. Además de toda la ayuda y conocimientos que habéis aportado para que se pudiera realizar el proyecto satisfactoriamente.

Gracias a todo el personal de LITEM tanto profesores como alumnos por apoyarnos y aportar recomendaciones.

También quería agradecer al lector por dedicar un rato para leer este documento que representa los resultados del trabajo realizado.

Índice de contenidos

1. Resumen	1
2. Introducción	2
2.1. Objetivos	2
2.2. Alcance	2
2.3. Justificación	2
2.4. Estado del arte	3
3. Método de construcción de la probeta	8
3.1. Materiales.	8
3.2. Caracterización de los materiales	9
3.3. Configuración de las distintas probetas.	12
3.4. Construcción de las probetas.	13
4. Configuración del ensayo e instrumentación	23
5. Resultados y Discusión	25
6. Análisis de seguridad y salud	39
7. Presupuesto	40
8. Impacto ambiental	41
9. Conclusiones	42
10. Bibliografía	44

Índice de figuras

1. Vista microscópica de un conjunto de fibras ordenadas	3
2. Sección tipo de un forjado mixto	4
3. Algunos ejemplos de secciones de chapa	5
4. Efecto de la presencia de agua en la tasa de liberación de energía	6
5. Instalación de CFRP en un silo industrial	6
6. Materiales de construcción utilizados, fibra de carbono, resina epoxi, malla de fibra de vidrio, hormigón, resina endurecedora, arena y piedra respectivamente	9
7. Esclerómetro	10
8. Muestras de hormigón	10
9. Probetas realizadas	13
10. Vista frontal de la chapa de acero utilizada	14
11. Chapa de acero tras aplicar el desmoldeante	14
12. Aplicación de la resina a la fibra de carbono	16
13. Distribución de pesos durante el tiempo de secado de la resina	16
14. Fabricación del molde de madera	17
15. Probeta con refuerzo de piedras	18
16. Probeta con refuerzo de piedras, arena y malla inclinada	19
17. Probeta con refuerzo de piedras, arena y malla	19
18. Defectos en el hormigonado de la parte inferior de la malla	20
19. Probetas recién hormigonadas	21
20. Probetas tras 1 semana de fraguado	21
21. Resultado final tras 4 semanas de fraguado	22
22. Configuración del ensayo	23
23. Mx840A	24
24. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta sin refuerzo interno 1	25
25. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta sin refuerzo interno 2	25
26. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Piedra 1	26
27. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Piedra 2	26
28. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra 1	27
29. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra 2	27
30. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra Arena 1	28
31. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra Arena 2	28
32. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla inclinada Piedra Arena 1	29
33. Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla inclinada Piedra Arena 2	29
34. Comparación todas las probetas	30
35. Comparación rugosidad	30
36. Comparación efecto de la malla	31
37. Comparación efecto del ángulo en la malla	31

38. Comparación carga máxima	33
39. Comparación distribución de cortante medio máximo	33
40. Diferencia de rugosidad entre los especímenes sin refuerzo interno 1 y 2	34
41. Corte de las fibras vidrio	35
42. Desprendimiento parcial de la tira de CFRP	36
43. Desprendimiento completo del bloque de hormigón	36
44. La fibra de vidrio no se ha roto limpiamente y además la tira de CFRP de la izquierda no se encuentra unida ni a la base ni al bloque de hormigón	37

Índice de tablas

1. Resultados obtenidos del esclerómetro	11
2. Caracterización del hormigón	11
3. Resultados	32
4. Influencia de los diferentes materiales	38
5. Energía consumida durante el estudio	41

1. Resumen

Este documento trata sobre un estudio de un material compuesto formado por una chapa de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) y hormigón cuando es sometido a un esfuerzo de cortante.

Consta de una breve introducción del proyecto (objetivos, alcance, justificación) junto con la explicación del estado del arte. Seguidamente se explican los materiales utilizados y las probetas, además de la caracterización del hormigón. También se detalla el proceso de construcción de las probetas y su posterior ensayo. Finalmente se procesan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

Además, se incluye un análisis de seguridad y salud junto con una estimación del presupuesto necesario para realizar el proyecto y el impacto ambiental del mismo.

Tras la realización se concluye que los especímenes sin malla son capaces de resistir una carga máxima a rasante de entre 0 y 4.5 kN dependiendo de la rugosidad en el contacto, la adicción de piedras mejora dicha rugosidad. En el caso de incluir una malla de fibra de vidrio como elemento de unión mejora la resistencia entre un rango de 4.5 y 7 kN y la ductilidad del material.

Abstract

This document is about a study of a composite material formed by a polymer sheet reinforced with carbon fibre (CFRP) and concrete when it is subjected to shear stress.

It consists of a brief introduction to the Project (objectives, scope, justification) along with an explanation of the state of the art. It then explains the materials used and the test tubes, as well as the characterisation of the concrete. Also detailed is the process of construction of the test tubes and their subsequent testing. Finally, the results obtained in the different tests are processed.

In addition, a health and safety analysis is included along with an estimate of the budget needed to carry out the project and its environmental impact.

After the execution, it is concluded that the specimens without mesh are capable of resisting a maximum load between 0 and 4.5 kN depending on the roughness in the contact, the addition of stones improves this roughness. In the case of including a fiberglass mesh as a binding element, it improves the resistance between a range of 4.5 and 7 kN and the ductility of the material.

2. Introducció

2.1. Objectius

El objectiu és realitzar un estudi d'un material compost proposat, una chapa de CFRP amb forma d'omega i formigó, al aplicar-li una força de rasant. A més, s'estudiarà la influència de diferents materials utilitzats com a connexió (pedra, arena, fibra de vidre).

2.2. Alcance

El alcance del treball inclou els següents apartats:

- Selecció de les diferents probetes que se ensayarán.
- Establir un protocol de fabricació.
- Fabricació de les probetes.
- Caracterització del CFRP i el formigó.
- Evaluació dels resultats obtinguts en els diferents ensayos.
- Elaboració del cost de fabricació i ensayo de les probetes.

2.3. Justificació

Des de l'antigüedat s'ha buscat millorar els materials utilitzats en les construccions, de manera que aquestes siguin més resistents i segures.

Actualment, el formigó armat és el material més utilitzat en la construcció, consisteix en barres d'acer que s'introdueixen en formigó, dotant-lo de major resistència a la tracció i flexió.

Sota aquest mateix procediment es proposa la substitució de l'armadura d'acer per CFRP, sent aquest un material més resistent i més lleuger. No obstant això, no es proposa utilitzar barres de CFRP sinó una chapa amb forma d'omega.

Una avantatge del formigó armat és la bona adheència que tenen ambdós materials, en el cas de la làmina de CFRP és necessari afegir reforços interns que millorin la adheència entre els dos materials.

Per això és necessari realitzar un estudi sobre la resistència, en aquest cas a rasant, del material compost proposat i la influència de diferents reforços interns que millorin la adheència entre aquests. D'aquesta manera podrem predir el comportament del material i la forma de desprendiment d'aquests dos materials.

Con això obtindríem un nou material de construcció que, a diferència del formigó armat, no s'oxida i és més lleuger per la qual cosa és més fàcil de col·locar i transportar. A més, de tractar-se d'un material amb una vida útil més elevada i menors costos de manteniment.

2.4. Estado del arte

Se comenzará con una breve introducción de los dos materiales predominantes en el estudio, CFRP y hormigón, seguidamente se hablará de que es un material compuesto y los antecedentes con dichos materiales.

A partir del siglo XVII, tras un desuso en el periodo medieval, se comienza a utilizar el cemento como material constructivo tras el descubrimiento de los aglomerados modernos. Se realizaron descubrimientos desde el buen comportamiento hidráulico de una mezcla de cal y arcilla que resistía la acción del agua de mar por el inglés John Smeaton, hasta que se inventó el cemento artificial gracias a Louis Vicat quien era un gran admirador del cemento romano [1].

El hormigón o concreto consiste en cemento mezclado con agua y agregados como grava, gravilla o arena y otros aditivos. Se trata de un material que soporta grandes esfuerzos a compresión sin embargo se fisura al soportar otros tipos de sollicitación (flexión, tracción, torsión y cortante). A raíz de esto se inventó el hormigón armado que consiste en reforzar el hormigón con una armadura hecha de malla de acero. La primera utilización del hormigón armado se atribuye al ingeniero francés Joseph-Louis Lambot en 1848 [1]. De esta forma el material es capaz de soportar esfuerzos a tracción y es más dúctil permitiendo un mayor desplazamiento antes de la rotura.

La fibra de carbono se trata de un material formado por fibras de entre 7 y 10 micras de diámetro compuesto por átomos de carbono [2]. Este material destaca por sus propiedades como alta flexibilidad, alta resistencia, baja densidad, tolerancia a altas temperaturas y baja expansión térmica, generalmente se combina con otros materiales, como en el caso de este estudio que utiliza resina, para dotarlo de forma y rigidez a flexión.

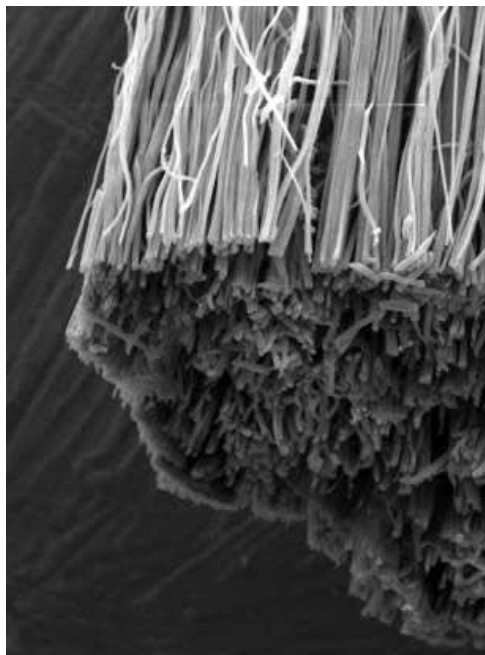


Figura 1: Vista microscópica de un conjunto de fibras ordenadas [3]

No hay una fecha exacta de cuando se descubrieron y empezaron a utilizar, sin embargo, se conoce que fue en la década de 1950 cuando en Estados Unidos se comenzó a investigar y desarrollar dichos materiales.

“Un material compuesto consiste en la combinación a nivel macroscópico de dos o más componentes no solubles entre ellos que se unen sinérgicamente, obteniéndose un material con una mayor capacidad estructural que la de sus constituyentes cuando actúan por separado” [1]. Está formado por dos fases, matriz y refuerzo. Las propiedades del material compuesto dependen de las propiedades de los materiales constituyentes, de su geometría, distribución y fracción volumétrica.

A pesar de sus propiedades estos materiales siguen teniendo el inconveniente de un coste elevado, lo que dificulta su uso en muchos ámbitos. Existen algunas excepciones como el hormigón armado siendo este el material más utilizado en construcción.

En la naturaleza existen diversos materiales compuestos como puede ser la madera de los árboles, fibras de celulosa en una matriz de hemicelulosa y lignina, o los huesos que están compuestos de fibras de colágeno en matriz de calcio o fósforo [4]. Se han realizado estudios para incluir fibras naturales en materiales compuestos obteniendo materiales con bajas densidades, fáciles de producir y más baratos, sin embargo existen problemas de compatibilidad en materiales naturales y sintéticos [5].

Como antecedentes directos del composite a estudiar en este proyecto se destaca el uso del acero junto con el hormigón como es el caso del hormigón armado o estructuras mixtas de hormigón y acero como la sección de la Figura 2. Para estos tipos de materiales existen normativas europeas como la BS-5950-82 para forjados colaborantes o el Eurocode 4 para estructuras mixtas.

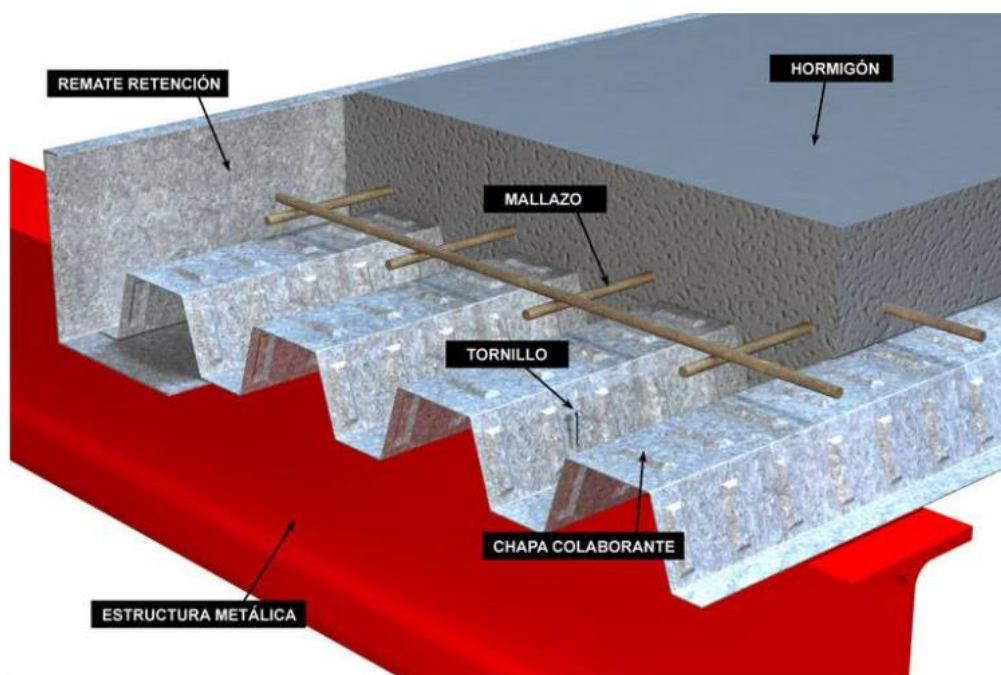


Figura 2: Sección tipo de un forjado mixto [6]

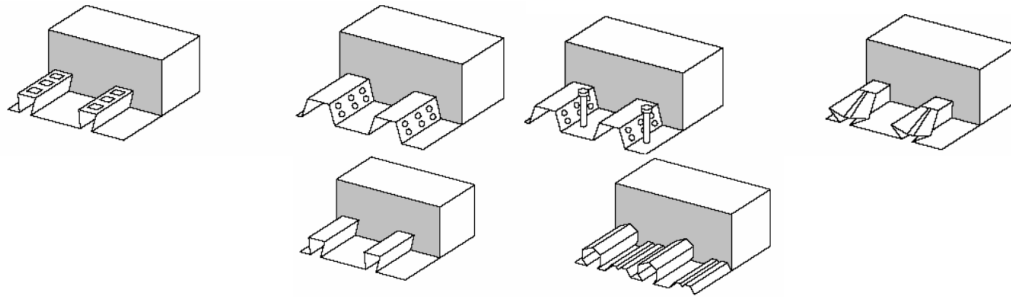


Figura 3: Algunos ejemplos de secciones de chapa [7]

Las características de este tipo de estructuras mixtas son la reducción del canto en los dinteles, aumento de la rigidez, soportes más esbeltos y reducción de costes en comparación con una estructura metálica tradicional [8].

En lo referente al FRP, existen antecedentes de materiales compuestos formados por hormigón, como es realizar una armadura de barras de fibra de carbono.

Al cambiar un refuerzo de barra de acero por otro de CFRP se obtiene un mayor desplazamiento de la viga hasta la rotura, mayor factor de deformabilidad, cambia el modo de fallo de un fallo del acero a una rotura del hormigón, sin embargo es menos dúctil [9].

La fibra de carbono tiene mejores propiedades que el acero, sin embargo, su precio es muy elevado, por otra parte, a diferencia del acero la fibra de carbono no se oxida por lo que es un buen sustituto en casos donde trabajará en ambientes de gran humedad donde la oxidación del acero empeore las propiedades del material con el tiempo. Tiene gran resistencia a la corrosión.

A raíz de esto se ha estudiado el efecto de la presencia del agua, sumergimiento completo, en la durabilidad del enlace CFRP – hormigón [10].

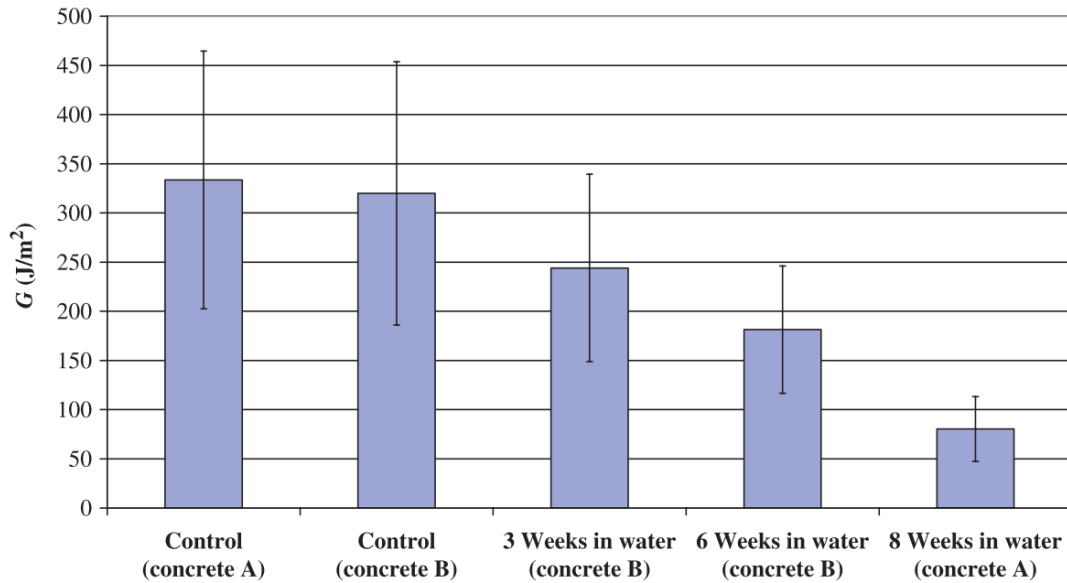


Figura 4: Efecto de la presencia de agua en la tasa de liberación de energía [10].

En la industria se utilizan composites de CFRP-hormigón, una vez está construida la estructura de hormigón, se recubre con láminas de CFRP [11], obteniendo así una colocación sencilla y más rápida.

Una de las principales diferencias respecto utilizar una chapa de acero son que con el CFRP se obtiene un material anisótropo, por lo que el tipo de fibras, su orientación y cantidad de fibras por hilo están directamente relacionado con la resistencia a tracción y rigidez.

Principalmente se ha utilizado para mejorar la estructura a flexión y cizalla, confinamiento de columnas y mejora de la ductilidad. Se ha utilizado el FRP para mejorar la resistencia en caso de terremoto en estructuras de hormigón, aumentar las capacidades de desplazamiento global, disipación de energía o mayor resistencia al pandeo.

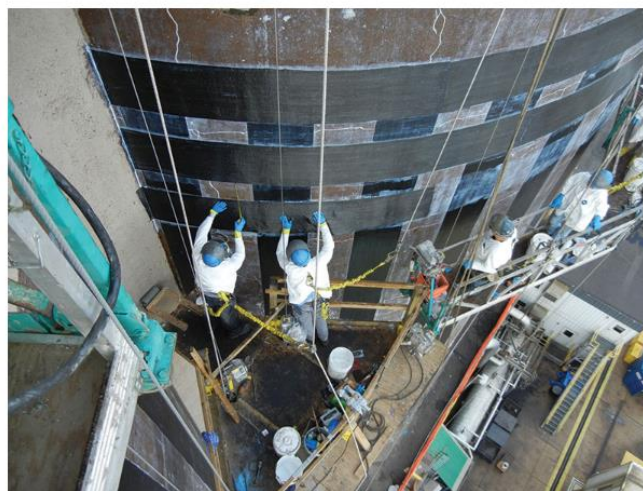


Figura 5: Instalación de CFRP en un silo industrial [12]

Hay antecedentes del uso de FRP no solo en nuevas construcciones sino también en la rehabilitación de construcciones civiles como puentes [13].

Por otra parte, también hay casos de compuestos entre metales como el aluminio y CFRP [14].

Por ultimo cabe destacar lo que podrían ser las investigaciones futuras de este campo con la nueva generación de fibras de carbono: “La próxima generación de fibra de carbono que consiste en fibras de carbono que se modifican en la superficie con diferentes polímeros, los nanotubos de carbono (CNT) o el grafeno tienen una conductividad mecánica, física y térmica / eléctrica mejorada en comparación con la fibra de carbono prístina. El potencial de usar esta clase de fibras de carbono en lugar de la fibra de carbono prístina podría ser un campo interesante para futuras investigaciones.”[15].

A pesar de todos estos antecedentes, no se encuentran precedentes de la configuración a estudiar en este documento con una chapa de CFRP con forma de omega, aunque si se han realizado estudios anteriores en este departamento, LITEM-UPC.

3. Método de construcción de la probeta

3.1. Materiales

Los materiales por los que están compuestos las probetas son los siguientes:

- Fibra de carbono, MasterBrace® FIB 300/50 CFS
Lámina de fibra de carbono grado aeroespacial unidireccional de muy alta resistencia.
- Resina
 - Resina epoxi, Resoltech 1200
 - Endurecedor epoxi, Resoltech 1204

Sistema de resina epoxi de última generación para laminación manual, formulado sin diluyentes reactivos.
- Piedra, Gravilla 5/12 Sorigue
Gravilla artificial lavada, sin finos.
- Arena, Arena normal (0-4 mm) Mause
Mezcla de compuestos de arenas lavadas.
- Malla de fibra de vidrio, Mapegrid G220
Malla de fibra de vidrio resistente a los álcalis, pre-aprestada, para el refuerzo estructural armado.
- Hormigón, Hormigón seco Fiasa HS-25
Mezcla regular y homogénea de áridos, cemento y aditivos en seco.

La piedra y arena tiene la función de producir rugosidad en la superficie de CFRP de manera que el hormigón se pueda adherir con mayor facilidad mientras que la malla de fibra de vidrio tiene la función de unir mejor los dos materiales y mejorar su resistencia y distribuir la tensiones. La malla está formada por hilos de fibra de vidrio que forman una geometría cuadrada y la utilizaremos de dos formas a 0° siendo los hilos paralelos al CFRP y a 45°, de esta forma obtendremos más superficie de unión con el CFRP y mejor resistencia a cortante.



Figura 6: Materiales de construcción utilizados, fibra de carbono, resina epoxi, malla de fibra de vidrio, hormigón, resina endurecedora, arena y piedra respectivamente

3.2. Caracterización de los materiales

En este apartado se caracterizará los materiales de construcción procesados, es decir el hormigón y la fibra de carbono.

En el caso del hormigón se tomaron muestras durante el hormigonado de las probetas para realizar un ensayo destructivo, sin embargo, al no poder utilizar el equipo necesario se optó por realizar un ensayo no destructivo en cada una de las probetas mediante el uso de un esclerómetro.



Figura 7: Esclerómetro



Figura 8: Muestras de hormigón

Se calcula la tensión última del hormigón realizando la media de los datos obtenidos.

El módulo elástico del hormigón se calcula con la siguiente ecuación[16]:

$$E_c \text{ (N/mm}^2\text{)} = 15.1\sqrt{f_c}$$

Siendo f_c la tensión última del hormigón en kg / cm².

A continuació, se presenten los resultados de las 5 repeticiones del ensayo para cada espécimen:

Especímenes	Resistencia a compresión (MPa)				
Sin refuerzo 1	20	18	18	20.5	18
Sin refuerzo 2	19	19	17	20	20
Piedra 1	14	18	18	14	18
Piedra 2	22	23.5	22	21	18
Malla piedra 1	14	15	18	18	15
Malla piedra 2	14	14	18	14	20
Malla piedra Arena 1	20	20	20.5	20	22
Malla piedra Arena 2	22	21.5	21.5	20.2	20
Malla inclinada piedra Arena 1	18	20.5	20	20	20.5
Malla inclinada piedra Arena 2	20	20	20.5	18.5	22

Tabla 1: Resultados obtenidos del esclerómetro

Especímenes	Tensión última del hormigón (MPa)	Módulo elástico (N / mm ²)
Sin refuerzo 1	18.9	20 963
Sin refuerzo 2	19.0	21 018
Piedra 1	16.4	19 527
Piedra 2	21.3	26 893
Malla piedra 1	16.0	19 288
Malla piedra 2	16.0	19 288
Malla piedra Arena 1	20.5	21 832
Malla piedra Arena 2	21.0	22 097
Malla inclinada piedra Arena 1	19.8	21 456
Malla inclinada piedra Arena 2	20.2	21 672

Tabla 2: Caracterización del hormigón

Por la misma razón que el caso del hormigón no se ha podido realizar un ensayo destructivo al CFRP, por lo que en este caso supondremos que tiene un valor menor al de las referencias ya que este se ha construido manualmente en el laboratorio y puede contener defectos de fabricación que produzcan una menor resistencia a los producidos industrialmente.

El modulo elástico del CFRP utilizado oscila entre 30 y 50 GPa, por lo que se supondrá que el utilizado posee un módulo elástico de 20 GPa.

A partir de ensayos anteriores (datos proporcionados por LITEM) se establece la resistencia a tracción del CFRP construido es de 1300 MPa.

3.3. Configuración de las distintas probetas

Para estudiar la influencia de los diferentes materiales que realizan la función de mantener la unión del CFRP y el hormigón, añadiendo rugosidad al CFRP en el caso de la piedra y la arena o produciendo un refuerzo interno en el caso de la malla de vidrio se realizarán las siguientes probetas:

- CFRP + hormigón.
- CFRP + piedra + hormigón.
- CFRP + piedra + malla + hormigón.
- CFRP + piedra + arena + malla + hormigón.
- CFRP + piedra + arena + malla inclinada + hormigón.

Se construirán dos probetas de cada configuración obteniendo así un total de 10 ensayos.

Las dimensiones de las probetas serán de 0,4x1 m, puesto que se realizarán ensayos de rasante la probeta tendrá hormigón en los laterales dejando el centro sin hormigonar para poder realizar el ensayo, siendo un lateral más pequeño que el otro de 22 y 42 cm realizando el ensayo en el bloque pequeño. Los bloques de hormigón tienen una altura de 10 cm.

La piedra se colocará en la parte inferior, mientras que la arena se pondrá en la parte inferior e inclinada dejando la parte superior para establecer la unión con la malla de fibra de vidrio.

Se ha seleccionado la forma de omega en el CFRP principalmente por los siguientes motivos:

Geométricamente al tener una parte inclinada se aumenta la superficie de contacto entre los dos materiales respecto una lamina plana, por lo que mejora el comportamiento entre ellos. Mecanicamente, posee una inercia superior, por lo que en el caso de estar bajo un esfuerzo de flexion es mas rigida, permite aumentar el momento ultimo y las deformaciones seran mas pequeñas que eel caso de una lámina plana.



Figura 9: Probetas realizadas

3.4. Construcción de las probetas

Durante el proceso de construcción se han seguido las medidas de seguridad presentadas en el apartado 7 de la memoria.

A continuación, enumeraremos los materiales que se han utilizado durante todo el proceso, excluyendo lo que conforman la probeta que se han citado anteriormente.

- Chapa de acero con forma de omega
- Papel de horno
- Acetona
- Desmoldeante, *Release Agent* Zyvax
- Carton
- Pegamento de barra
- Cianocrilato
- Cinta adhesiva
- Desmoldeante, alcohol polivinílico
- Madera
- Papel transparente
- Silicona
- Alcohol Metanol 95%
- Disolvente
- Limpiador multiusos
- Poliestireno expandido

Para la construcción de las diferentes probetas se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Fabricación del CFRP

Lo primero es preparar la chapa de acero prefabricada con forma de omega que utilizaremos como molde en la fabricación del CFRP, será necesario limpiar los restos de resina que pueda tener de anterior uso, así como polvo u otras impurezas, para ello se aplica una capa de acetona y con la ayuda de una rasqueta se retira los restos de resina

y/o desmoldeante, seguidamente se utiliza alcohol y limpiador multiusos para el cavado final.

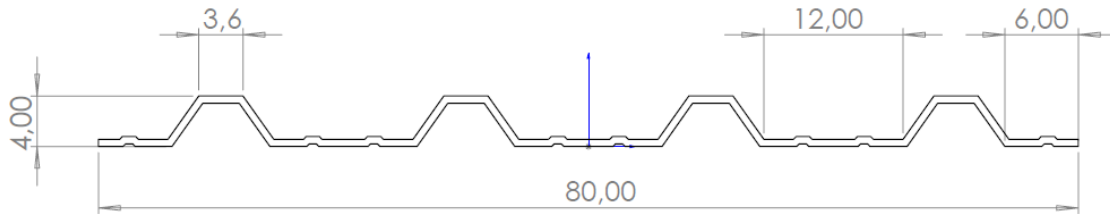


Figura 10: Vista frontal de la chapa de acero utilizada

Tras la preparación del molde se le aplica desmoldeante de la siguiente manera primero una capa de desmoldeante polivinili Y tras esperar el tiempo de secado de 1 hora se aplica una segunda capa, después se aplican dos capas de Release Agent Zyvox con un tiempo de secado de 15 minutos. Tras esto ya tenemos preparado el molde.

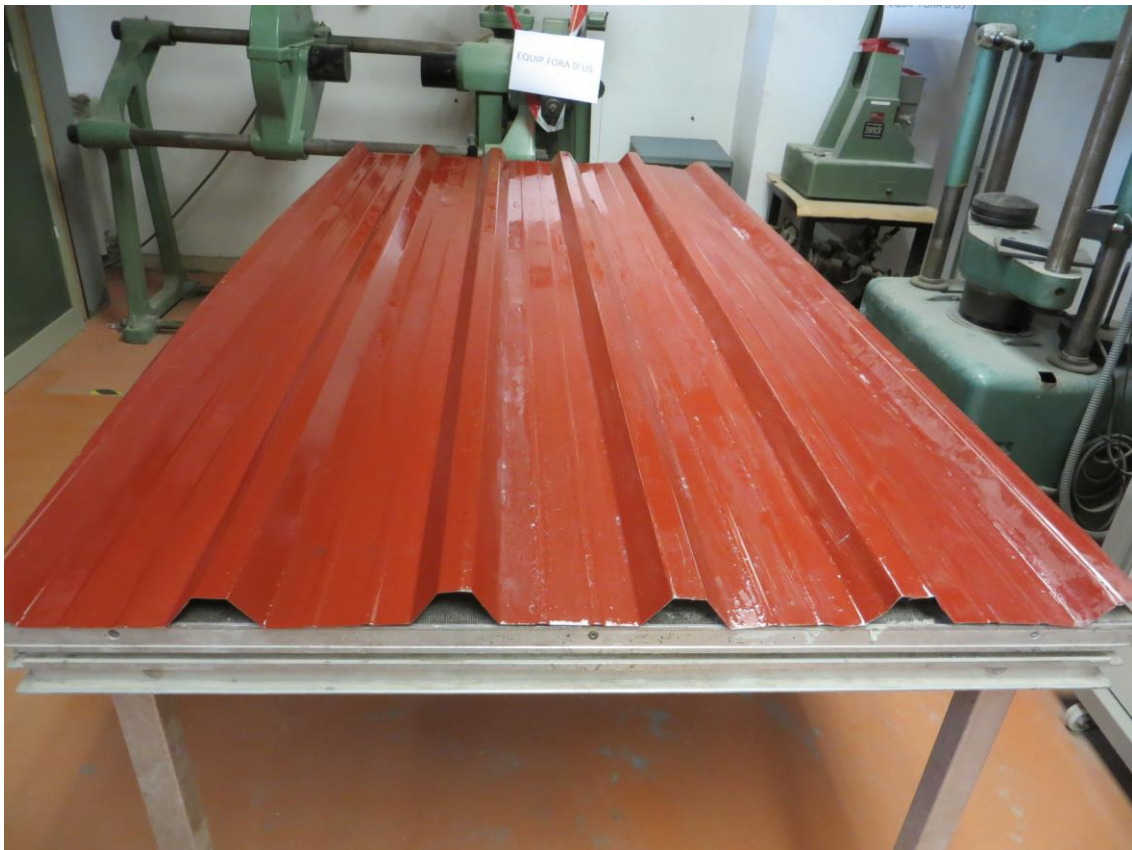


Figura 11: Chapa de acero tras aplicar el desmoldeante

Este método se utilizó una vez ya que tras tener problemas a la hora de separar el CFRP del acero se optó por utilizar papel de horno en la parte inferior. Con este cambio se ahorró tiempo de fabricación al no tener que esperar al secar el desmoldeante y dinero, al no utilizar el desmoldeante Zyvox cuyo precio es muy elevado. Por otra parte, se requería ser más cuidadoso, durante el proceso de fabricación el papel se puede mover

y no conseguir la forma correcta del molde. No se puede pegar el papel al molde debido a que se producen arrugas en el papel durante la fabricación.

Para el segundo método se corta el papel de horno en tiras de 2m y se unen los extremos con pegamento de barra en una superficie plana y después se dispone sobre el molde, de esta forma la resina no se puede introducir entre ellas produciendo imperfecciones en el molde.

Una vez está preparado el molde, se corta la fibra de carbono con las dimensiones deseadas que corresponden a la chapa de acero (0.8x2 m). Se utilizarán 3 capas de fibra de carbono, la primera y la última se pondrá de manera que las fibras estén en posición longitudinal mientras que la segunda capa será transversal. De esta forma se obtiene una construcción apilada al alternar la geometría de las fibras 90º obteniendo una mejor resistencia y rigidez.

Con todo esto ya podemos pasar a la fabricación del CFRP.

Se utiliza la misma masa de resina que fibra de carbono para ellos se pesa la fibra que se va a utilizar y se calcula para cada caso la resina necesaria. En términos generales se ha utilizado:

- 1.825,3g fibra de carbono
- 1.825,3g resina
 - 1352,1g epoxi
 - 473,2g endurecedor

La resina se mezcla según la relación que proporciona el fabricante que es 100g de epoxi por cada 35g de endurecedor.

Tras esto se divide la resina en 3 partes iguales para poner en las 3 capas de fibra de carbono y se aplica resina en la misma dirección de las fibras. En el caso de la primera capa se impregna inicialmente el molde para asegurarnos de que tenga resina en caso de que no penetre bien, y se pone la capa de fibra de carbono asegurando que obtiene la forma del molde y no quedan burbujas de aire; el resto de resina se utiliza para impregnar la parte superior del carbono. En el resto de capas se pone toda la resina en la parte superior.



Figura 12: Aplicación de la resina a la fibra de carbono

Tras finalizar todas las capas se pone papel de hornear por encima y una segunda chapa de acero para recubrirlo. Y se distribuyen pesos de manera uniforme para aplicar presión al material durante el proceso de secado que dura 48h.



Figura 13: Distribución de pesos durante el tiempo de secado de la resina

2. Añadir refuerzo interno y adecuación del molde

Una vez ha pasado el tiempo de secado se retira el CFRP, y procedemos a cortarlo con las dimensiones que tendrá la probeta (0.40 x 1.0 m) de esta forma obtenemos 4 por cada chapa producida.

Se encaja cada trozo de CFRP en un molde de madera previamente preparado con las dimensiones dichas anteriormente (el molde de madera se encuentra plastificado para evitar su adherencia al hormigón y facilitar el proceso de retirada del molde) y se introducen como separador de los dos bloques de hormigón poliestireno expandido, utilizando silicona se sellan las juntas. Para la unión del molde se han utilizado tornillos y sargentos para que aguante la presión del hormigón y mantenga su forma original.



Figura 14: Fabricación del molde de madera

Tras tener el molde preparado se procede a introducir el refuerzo interno necesario según la probeta, en este caso se explicará la introducción de todos los materiales utilizados.

Lo primero a introducir es la piedra en la parte inferior se utiliza una capa de resina que cubra toda la superficie para su unión con el CFRP.

- 400g piedra
- 45g resina
 - 33.3g epoxi
 - 11.7g endurecedor

Tras esto se añade la arena en caso de ser necesaria añadiendo un poco más de resina en la parte inclinada, se añade arena en la zona inclinada y la inferior donde rellena los huecos de las piedras, la cantidad de arena utilizada es la siguiente:

- 200g arena



Figura 15: Probeta con refuerzo de piedras

Antes de añadir la malla en caso de ser necesaria se esperan 48h de secado de la resina y se retiran los restos de arena/piedra que no se han unido al CFRP.

La malla de fibra de vidrio se unirá en la parte superior de del CFRP mediante la adición de una capa adicional de CFRP, se pesa la fibra para utilizar la misma masa de resina que malla:

- 419g fibra de vidrio
- 419g resina
 - 310,4g epoxi
 - 108,6g endurecedor

El método de unión es el siguiente, se aplica una capa de resina en la parte superior y seguidamente se introduce la malla en su sitio de tal forma que tenga el máximo número de puntos de unión según lo permita la geometría se aplica una 2 capa de resina y una tira de CFRP que recubra la cresta del molde, por último, se aplica la resina sobrante encima de la fibra de carbono y al igual que la chapa de CFRP se cubre con papel de hornear y se distribuyen pesos que se retiraran tras pasar 48h.

La malla se une al molde de madera mediante una cinta adhesiva de manera que al hormigonar los laterales se mantengan en posición horizontal y no se hunda hasta tocar la parte inferior por el peso del hormigón.



Figura 16: Probeta con refuerzo de piedras, arena y malla inclinada



Figura 17: Probeta con refuerzo de piedras, arena y malla

3. Añadir el hormigón

Por último, se introduce hormigón en el molde.

La preparación del hormigón se ha llevado a cabo de la siguiente manera.

- 1 saco de hormigón seco = 25 Kg
- 2.5 L de agua

Se introducen 5L de agua en la hormigonera previamente humedecida y a continuación se introducen dos sacos de 25 Kg cada uno en la hormigonera siguiendo la proporción de agua-hormigón que indica el fabricante. Dejamos un par de minutos mezclarse y ponemos en hormigón en una cubeta para rellenar los moldes. Hasta una altura de 11 cm.

En los especímenes que tienen fibra de vidrio hay que tener especial cuidado de asegurarnos que el hormigón penetra bien a través de ella y no quedan zonas con poco hormigón o no obtendremos un espécimen uniforme; hay que tener en cuenta que la parte inferior del hormigón es la más importante, tras esto ponemos el hormigón necesario y lo vamos vibrando y aplanando con la ayuda de un nivel hasta obtener la altura deseada. Finalmente se ha alisado la superficie.



Figura 18: Defectos en el hormigonado de la parte inferior de la malla

Se utilizó 2 sacos de hormigón por espécimen + una muestra del hormigón para su posterior caracterización, de esta forma se podrá detectar diferencia en la mezcla de hormigón entre las diferentes probetas.

Una vez se ha hormigonado se cubren los moldes con film transparente para que se evapore menos agua durante el fraguado.

Pasada 1 semana se retiran los moldes y tras pasar 3 semanas más el fraguado se ha completa y podemos realizar los ensayos.



Figura 19: Probetas recién hormigonadas



Figura 20: Probetas tras 1 semana de fraguado

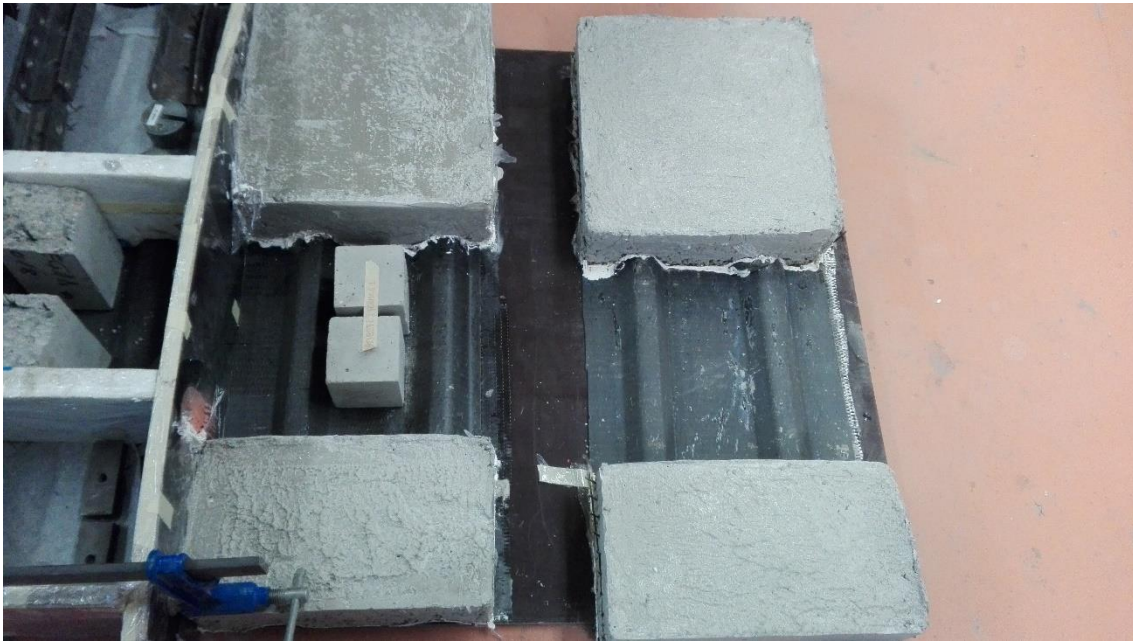


Figura 21: Resultado final tras 4 semanas de fraguado

4. Configuración del ensayo e instrumentación

La problemática del espécimen fabricado es que una vez se ha añadido el hormigón no se puede mover debido al hueco sin hormigón del centro ya que al intentar moverlo podría producirse la rotura del CFRP. Por lo tanto, se realizará el ensayo en el mismo lugar que se hormigonará.

De esta forma se utilizará la instrumentación funcional en dichas condiciones.

Un gato hidráulico colocado en el hueco para ejercer una carga junto con una célula de carga, U9C, que medirá la fuerza (con un límite de 10 kN) que se aplica en cada momento, además se ha utilizado un perfil entre el hormigón y la célula de carga para aumentar la superficie donde se aplica la fuerza. También utilizaremos dos sensores de desplazamiento, LVDT con un rango de hasta 20 mm y gran precisión (0.02% del rango, 0.004 mm), colocados 1 cm por encima de la cresta. Estos sensores medirán el desplazamiento del bloque de hormigón respecto al CFRP, por ello se adhieren unos perfiles al CFRP utilizando loctite y donde se fijan otros perfiles con forma de L, que servirán de apoyo para los LVDT.

El gato se colocará apoyado en el CFRP para que se encuentre lo más bajo posible debido a que en el material se produce la reacción en el contacto CFRP – hormigón y por lo tanto se puede producir un momento que rote el bloque de hormigón.

Los sensores se conectan al módulo MX840A que enviara los datos al portátil. El programa utilizado durante el ensayo para la adquisición de datos es el Catman easy.

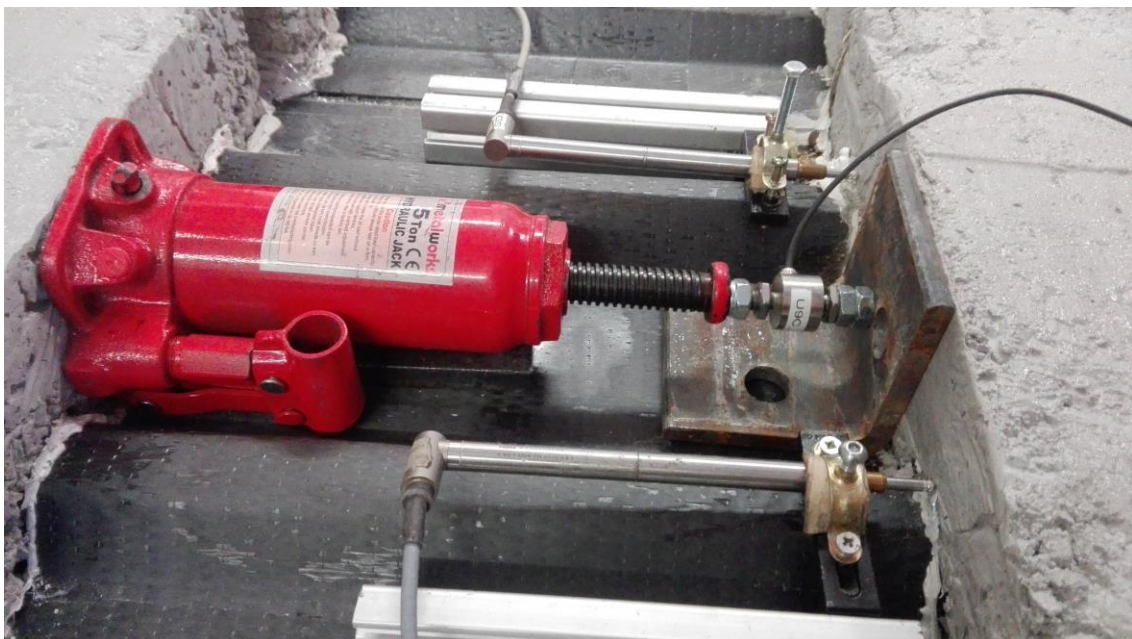


Figura 22: Configuración del ensayo



Figura 23: Mx840A

5. Resultados y Discusión

A continuación, se presentarán las gráficas fuerza-desplazamiento de todos los ensayos realizados, tras las consideraciones explicadas en el anexo, documento 3.

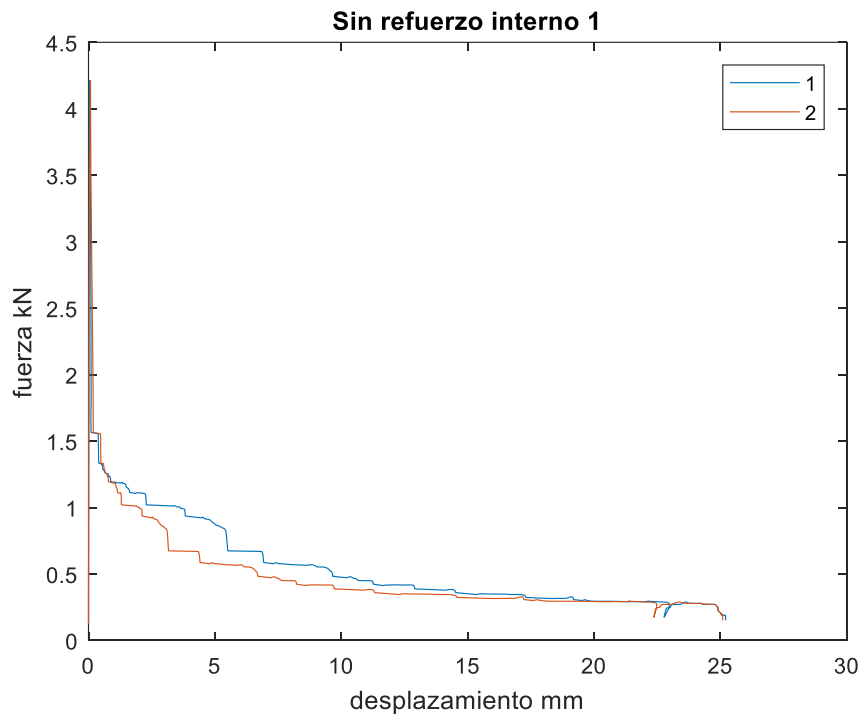


Figura 24: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta sin refuerzo interno 1

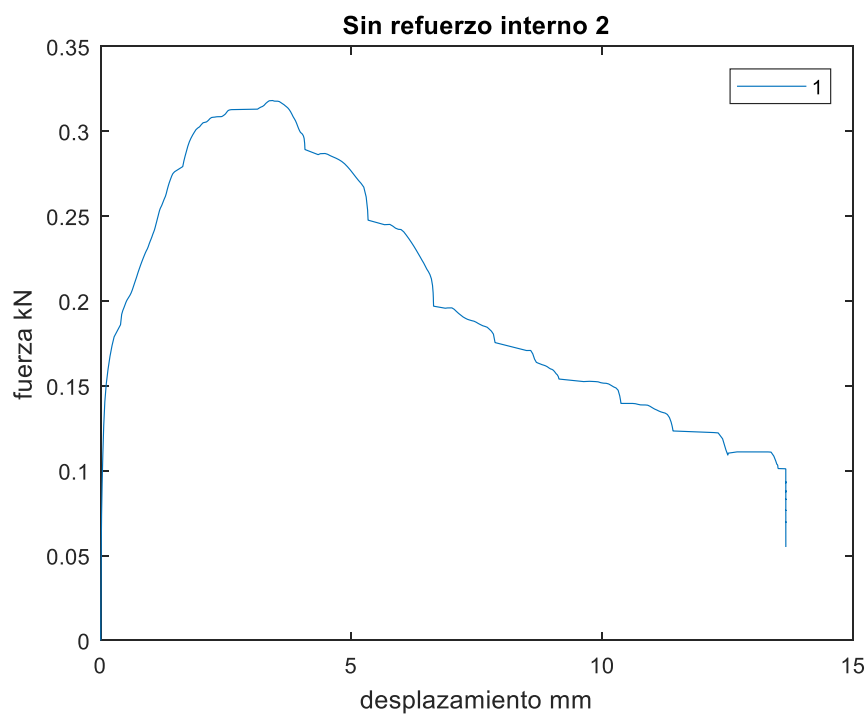


Figura 25: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta sin refuerzo interno 2

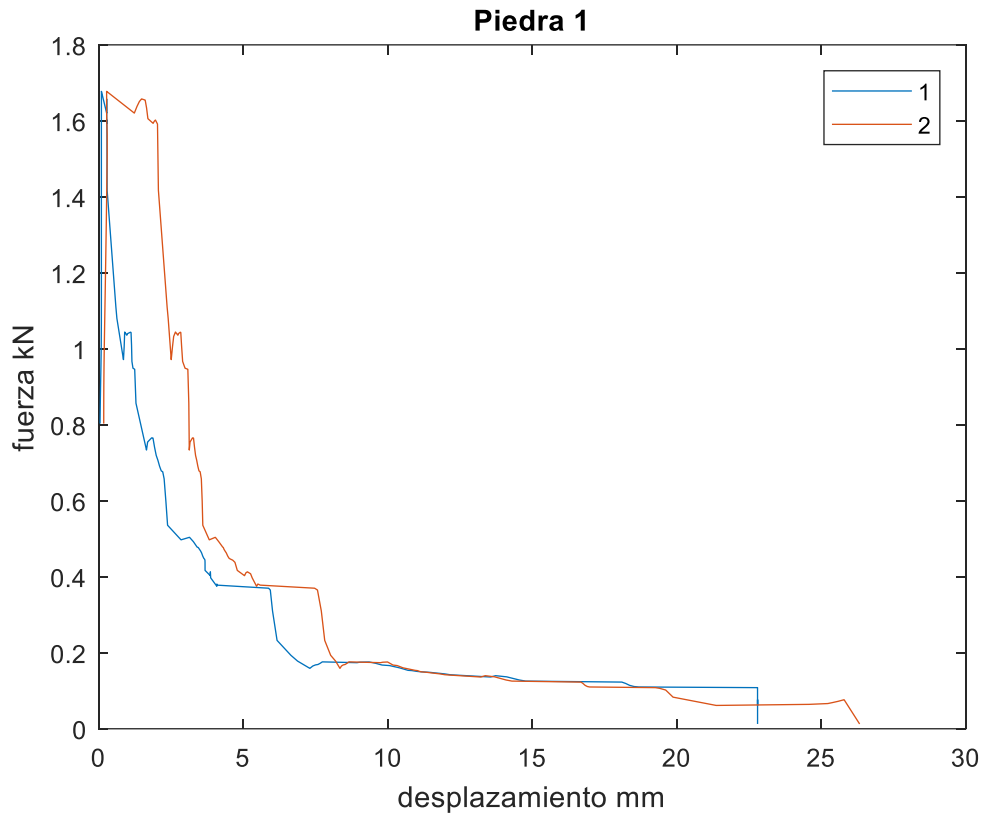


Figura 26: Gràfica fuerza-desplazamiento de la probeta Piedra 1

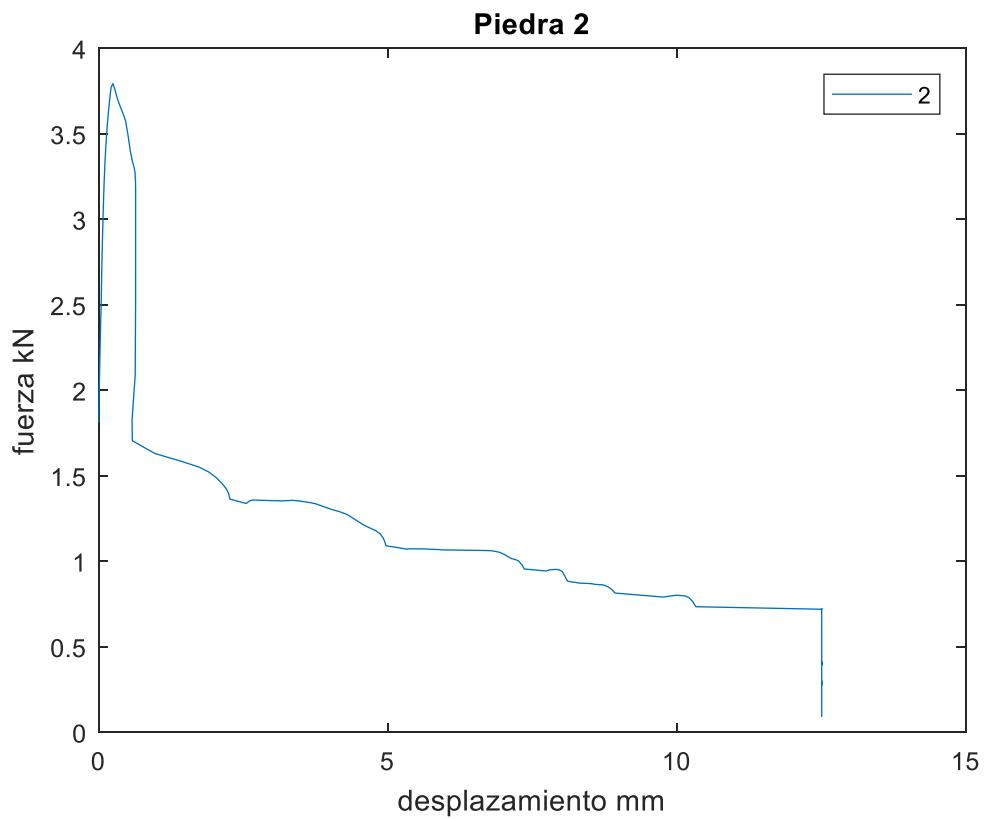


Figura 27: Gràfica fuerza-desplazamiento de la probeta Piedra 2

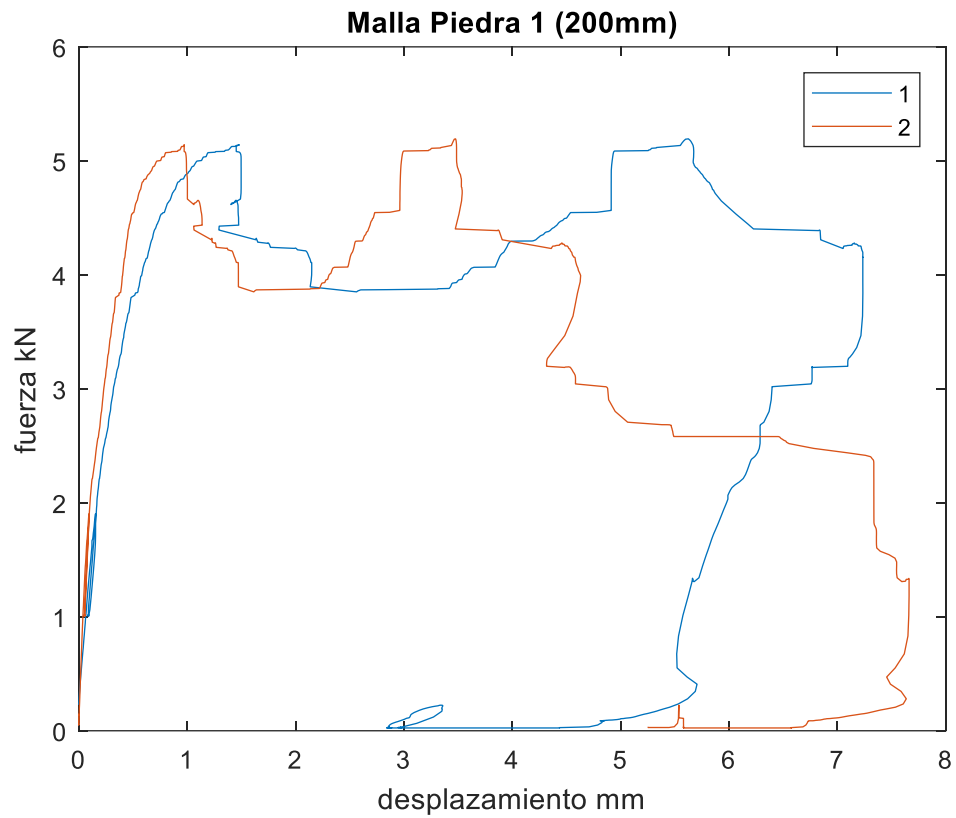


Figura 28: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra 1

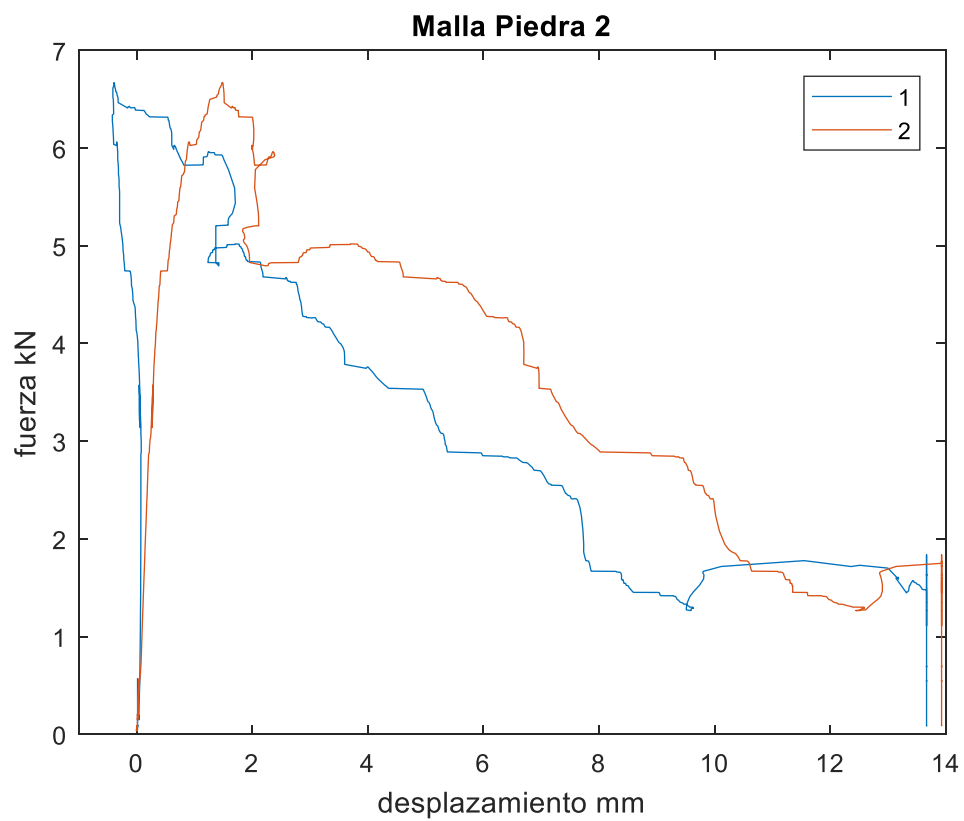


Figura 29: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra 2

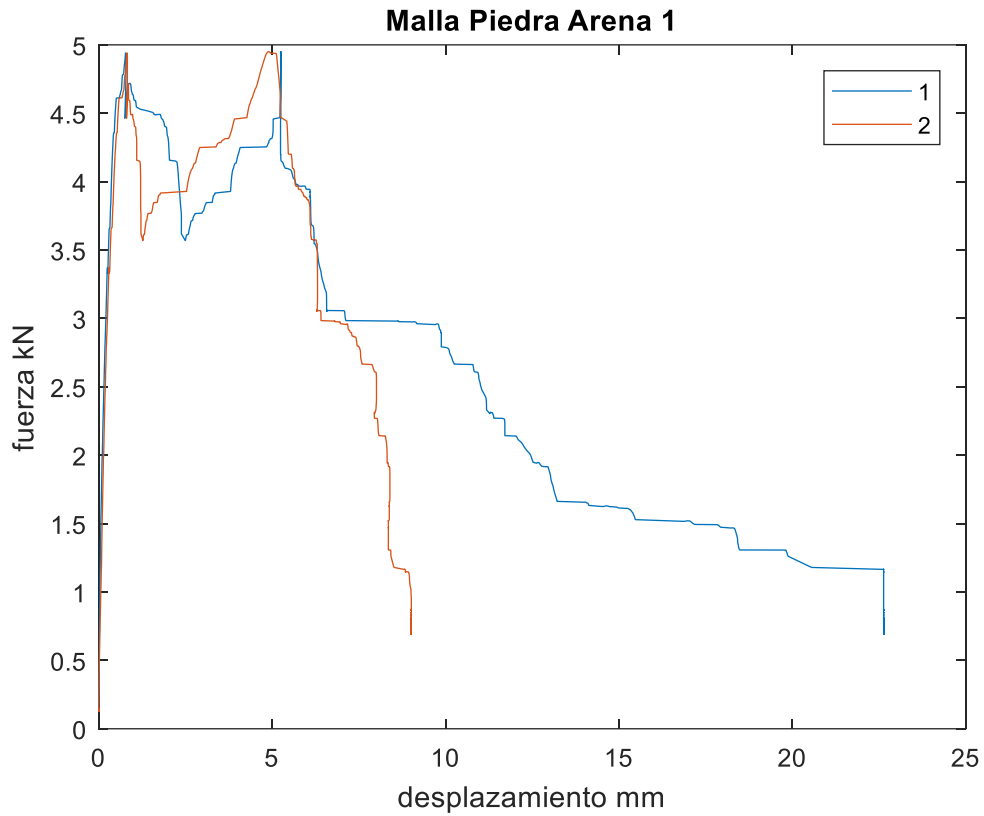


Figura 30: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra Arena 1

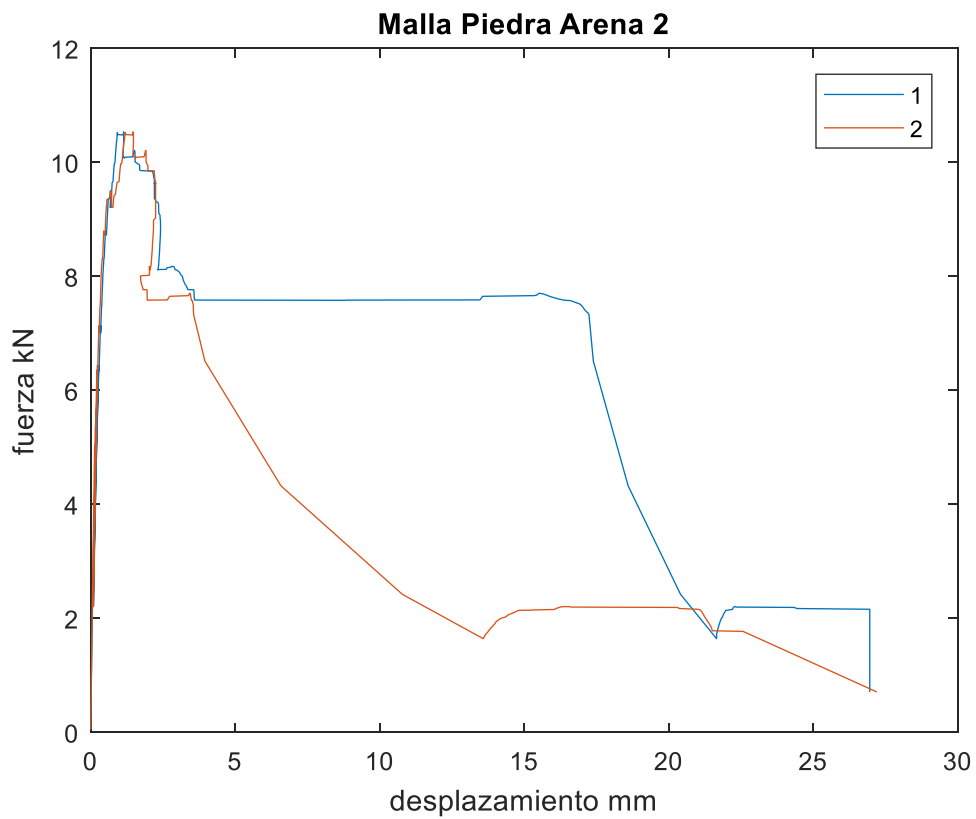


Figura 31: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla Piedra Arena 2

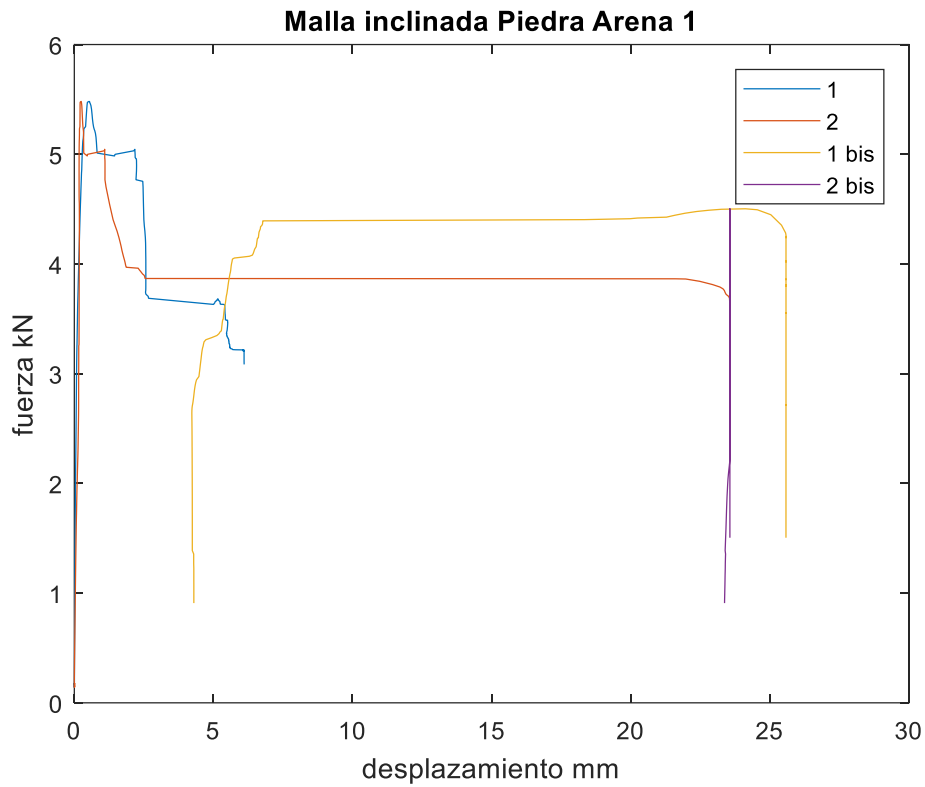


Figura 32: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla inclinada Piedra Arena 1

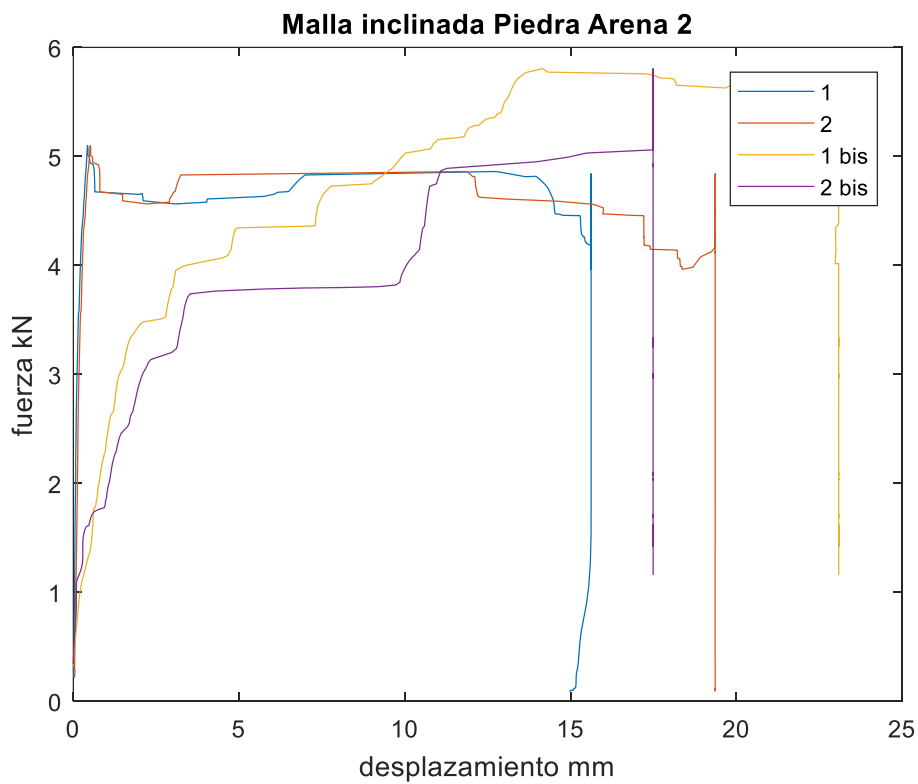


Figura 33: Gráfica fuerza-desplazamiento de la probeta Malla inclinada Piedra Arena 2

A continuació, se exposaran diferents gràfics per comparar les distintes configuracions, per ells se graficarà la carga en funció del promedi de los dos desplaçaments registrats.

Acrònims utilitzats:

- SRI 1: Sin refuerzo interno 1
- SRI 2: Sin refuerzo interno 2
- P 1: Piedra 1
- P 2: Piedra 2
- MP 1: Malla Piedra 1
- MP 2: Malla Piedra 2
- MPA 1: Malla Arena Piedra 1
- MPA 2: Malla Arena Piedra 2
- MIPA 1: Malla Inclínada Arena Piedra 1
- MIPA 2: Malla Inclínada Arena Piedra 2

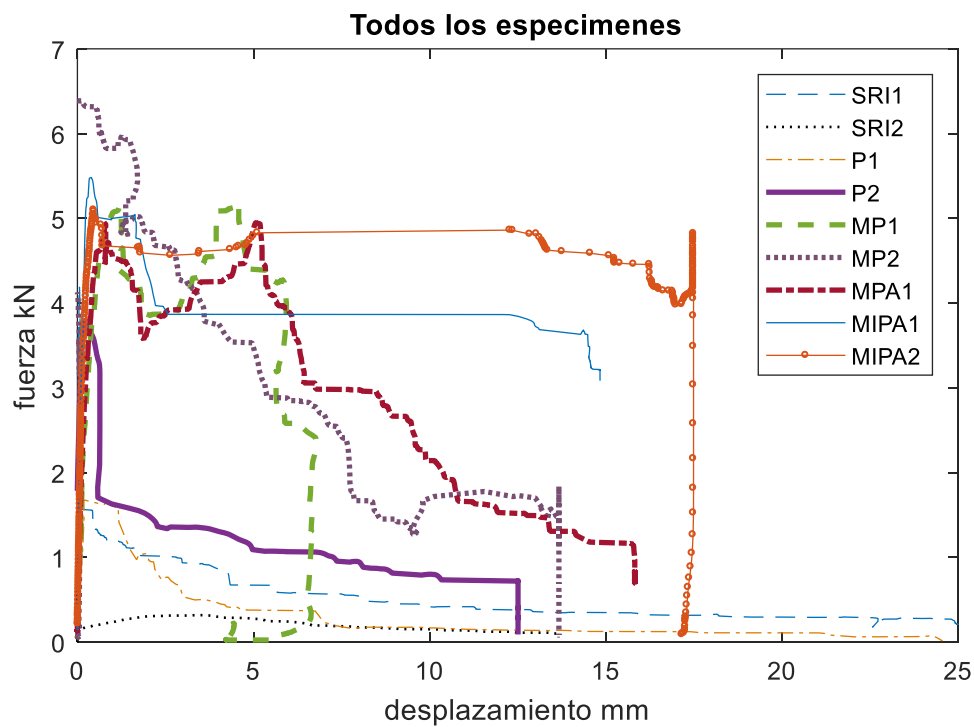


Figura 34: Comparación todas las probetas

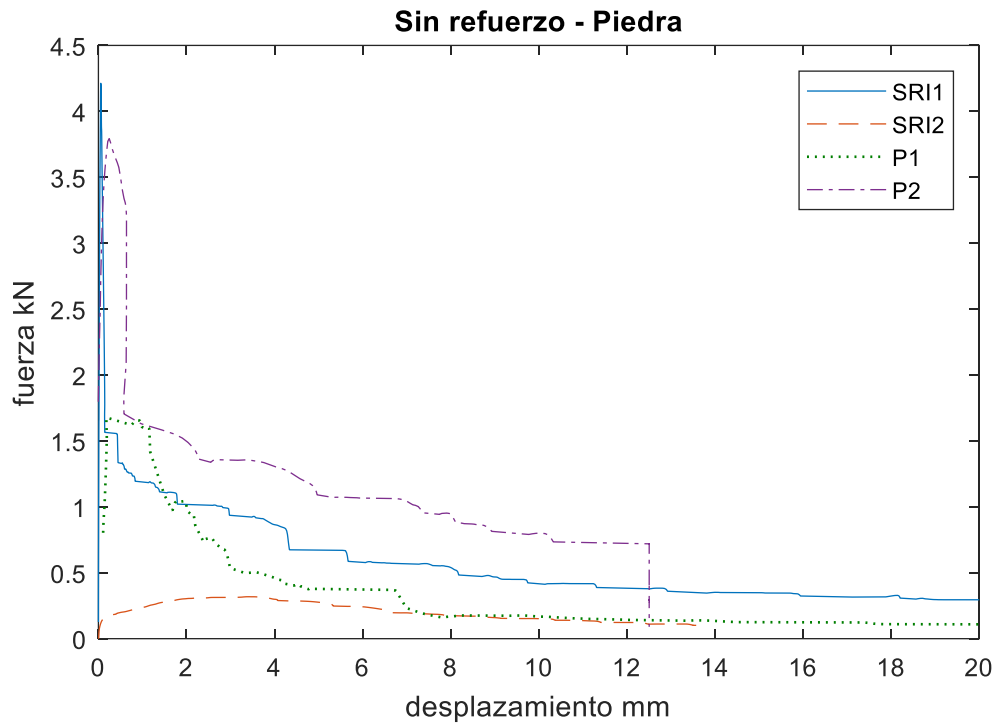


Figura 35: Comparación rugosidad

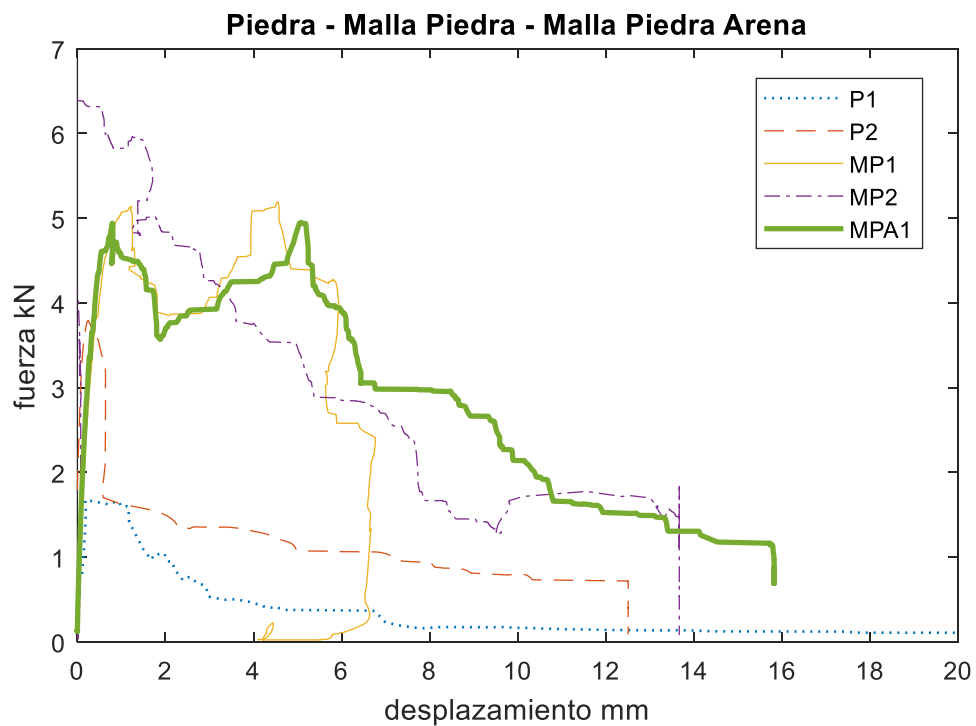


Figura 36: Comparación efecto de la malla

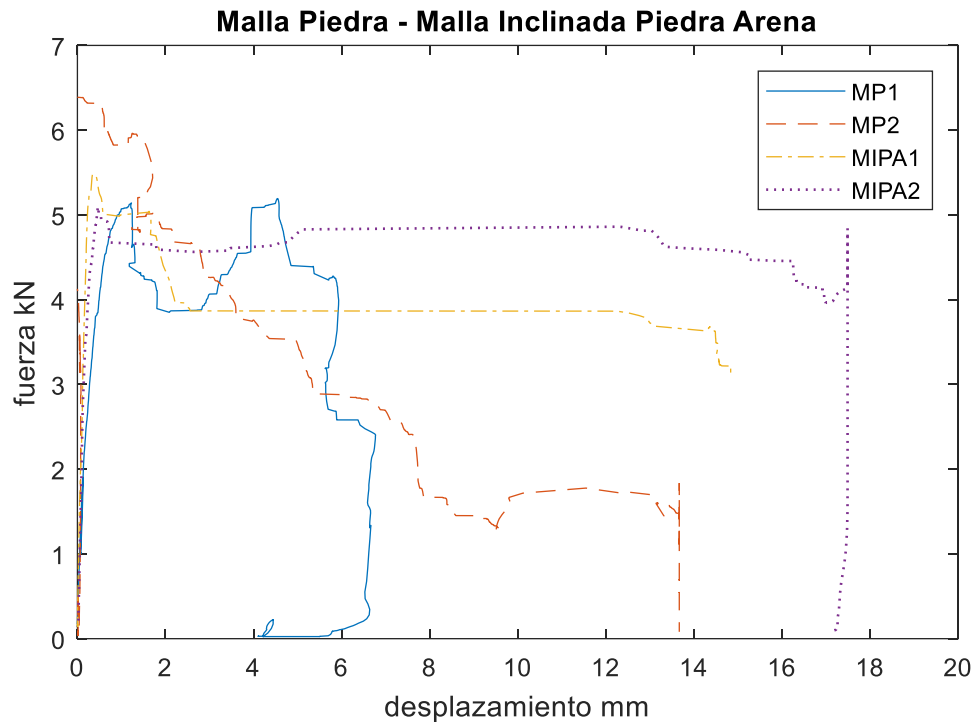


Figura 37: Comparación efecto del ángulo en la malla

Se calculará la distribución de cortante en el contacto hormigón CFRP, para ello realizaremos la simplificación de que es constante a lo largo del área, por lo que calcularemos un valor medio.

A partir de la fuerza ejercido y el área de contacto, calcularemos la distribución de cortante con la siguiente relación:

$$\tau_{medio} = P / A$$

Especímenes	Carga máxima (kN)	Cortante máximo (kPa)	Rotura
Sin refuerzo 1	4.22	47.9	Separación completa del bloque de hormigón del CFRP
Sin refuerzo 2	0.32	3.6	Separación completa del bloque de hormigón del CFRP
Piedra 1	1.67	19.1	Separación completa del bloque de hormigón del CFRP
Piedra 2	3.80	43.1	Separación completa del bloque de hormigón del CFRP
Malla piedra 1	5.20	64.9	Corte de la fibra de vidrio
Malla piedra 2	6.67	75.8	Rotura de la fibra de vidrio y desprendimiento parcial de la tira de CFRP
Malla piedra Arena 1	4.95	56.3	Corte de la fibra de vidrio
Malla piedra Arena 2	10.54	119.7	Corte de la fibra de vidrio
Malla inclinada piedra Arena 1	5.49	62.3	Rotura de la fibra de vidrio y desprendimiento parcial de la tira de CFRP
Malla inclinada piedra Arena 2	5.81	66.0	Rotura de la fibra de vidrio y desprendimiento parcial de la tira de CFRP

Tabla 3: Resultados

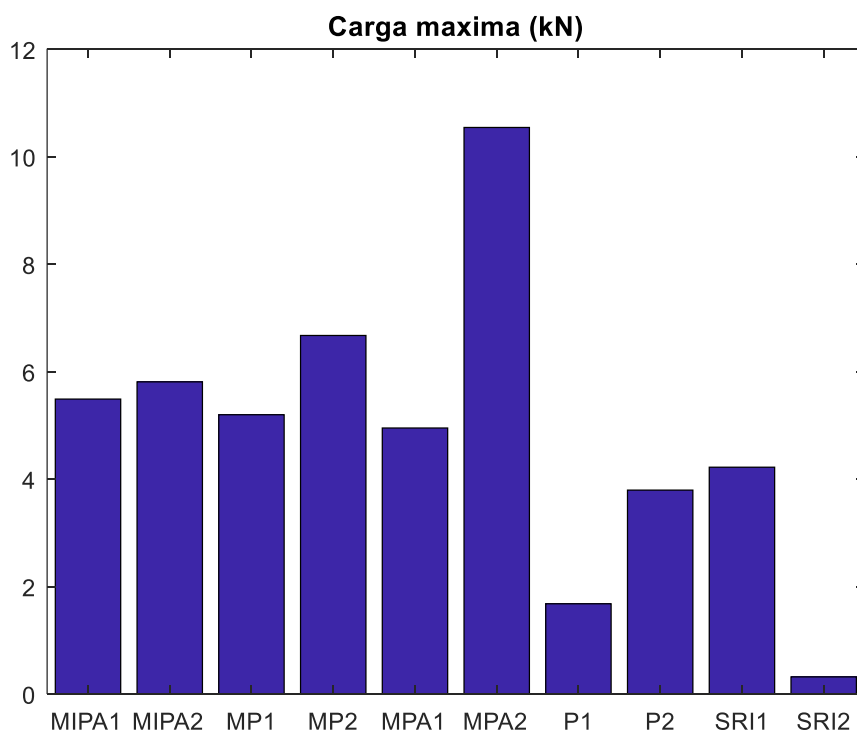


Figura 38: Comparación carga máxima

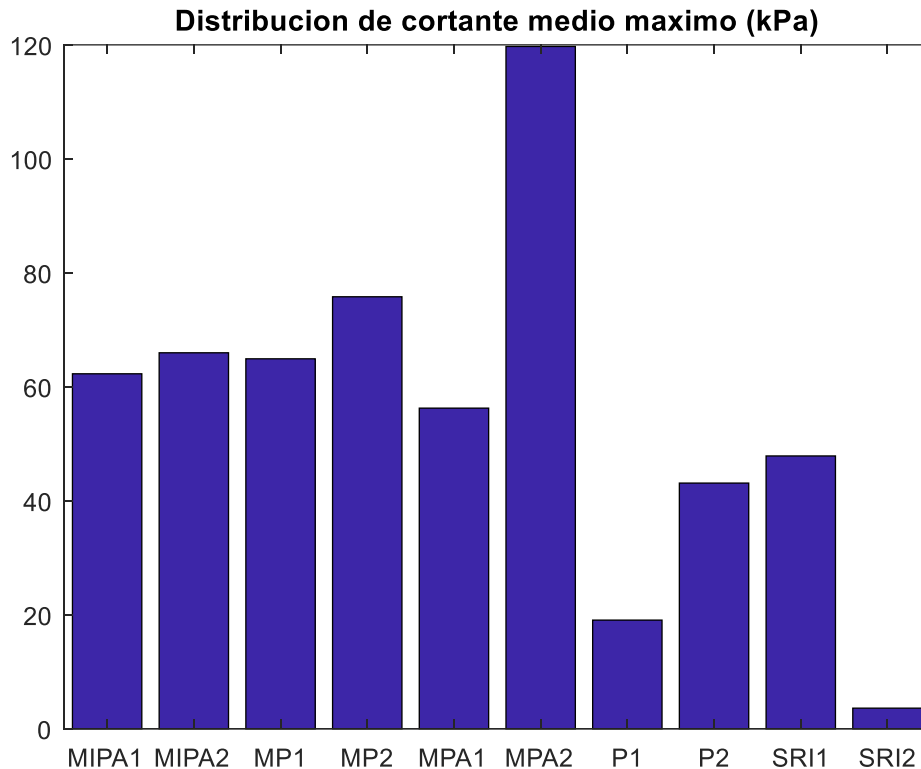


Figura 39: Comparación distribución de cortante medio máximo

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados extraemos las siguientes conclusiones.

En los especímenes sin malla el tipo de rotura es instantánea debido al desprendimiento del hormigón del CFRP, por lo tanto, la carga máxima que puede aguantar depende de la unión de estos siendo mejor cuanto más rugosidad existe en la unión. En las 4 gráficas correspondientes a especímenes sin malla se puede comprobar su comportamiento, presentando una resistencia inicial hasta llegar a la carga máxima y después presenta una distribución que corresponde a la fricción entre los dos materiales.

En el caso del espécimen sin refuerzo interno 2 donde no hay ninguna rugosidad hemos obtenido el resultado correspondiente a la fricción entre ambos materiales por el deslizamiento con una carga máxima de 0.32 kN. Este caso corresponde a la última probeta construida, siendo esta mucho más homogénea y mejor vibrada y fraguada que las anteriores. En los otros 3 casos donde la mezcla es menos homogénea y más rugosa se puede observar cargas máximas de 4.22, 3.80 y 1.67 kN, cuya disparidad se asocia a la calidad de hormigonado. A pesar de que los especímenes con piedra presentan una menor carga máxima, se ha podido observar en los especímenes tras la rotura que una parte de las piedras seguía adherida al CFRP mientras que la otra se encontraba en el bloque de hormigón, este es un signo de que las piedras han servido de nexo entre los dos materiales mejorando su unión y aumentando la rugosidad. Por este motivo se atribuye el hecho de que el espécimen sin refuerzo interno 1 presente una mayor resistencia a la calidad del hormigonado.

Con todo esto se concluye que el efecto de las piedras ayuda a mejorar la resistencia del conjunto CFRP-hormigón, sin embargo, no se puede afirmar que el efecto de la arena en la zona inclinada sea apreciable.

Los especímenes sin malla tienen una resistencia entre 0 – 4.5 kN dependiendo de la rugosidad.



Figura 40: Diferencia de rugosidad entre los especímenes sin refuerzo interno 1 y 2

A continuación, se analizará los casos de especímenes con malla sin tener en cuenta el espécimen Malla Piedra Arena 2, que se tratará al final.

En el caso de los especímenes con malla se detectó un defecto en el ensayo. Durante la realización del ensayo se producía una rotación del bloque de hormigón, en los dos especímenes de malla a 45º incluso se detectó que no solo el bloque de hormigón roto sino además se produjo una flexión del CFRP. Este defecto supone que no obtengamos un ensayo de rasante perfecto.

En todos los casos notamos una gran diferencia respecto a los especímenes sin malla. Tras llegar a la carga máxima estos siguen siendo resistentes, aunque aguantan una carga menor. Por lo tanto, con la adición de la malla se obtiene un material más dúctil y seguro ya que en caso de uso como material constructivo un fallo de este no supondría un colapso total de la estructura, ya que aún podría soportar ciertas tensiones. Las probetas ensayadas, tras la carga máxima soportan entre 20 y 25% de la carga máxima hasta llegar a la rotura definitiva de la malla de fibra de vidrio.

El aumento de la ductilidad está relacionado con el modo de fallo de material, que en este caso no es la separación del CFRP con el hormigón, sino la rotura de la malla de fibra de vidrio, según el espécimen se produjo una rotura perfecta de la malla o en otros casos la tira de CFRP se desprendió parcialmente junto con el bloque de hormigón.



Figura 41: Corte de las fibras vidrio, Malla Piedra 1



Figura 42: Desprendimiento parcial de la tira de CFRP, Malla Piedra 1

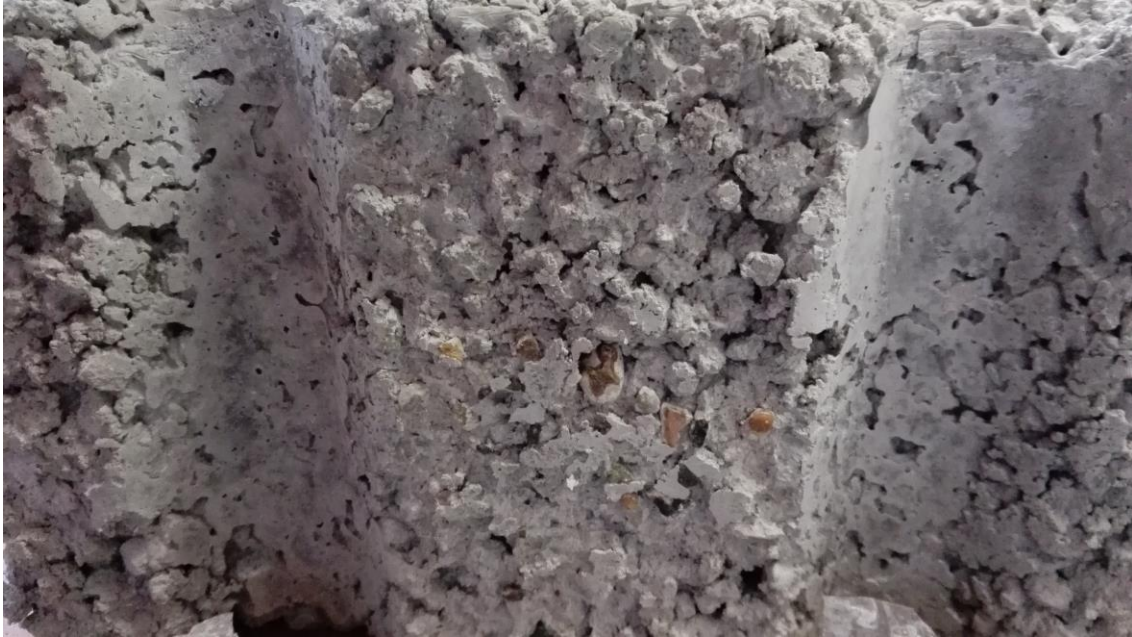


Figura 43: Desprendimiento completo del bloque de hormigón, Piedra 1

Además, de ser un material más dúctil se puede comprobar que en todos los casos la carga máxima es mayor que en los especímenes sin malla siendo la menor 4.95 kN. Al añadir la malla la resistencia aumenta. En el caso de incluir la malla obtenemos un rango de entre 4.5 – 7 kN de carga máxima.

Como se ha dicho anteriormente, no notamos diferencia entre el caso de Malla Piedra y Malla Piedra Arena que sin tener en cuenta el espécimen anómalo las diferencias se pueden atribuir al proceso constructivo. Por lo que el efecto de la arena no es muy notorio.



Figura 44: La fibra de vidrio no se ha roto limpiamente y además la tira de CFRP de la izquierda no se encuentra unida ni a la base ni al bloque de hormigón, Malla inclinada Piedra Arena 1

De la misma forma, no hay diferencias notorias en la resistencia de los especímenes con malla recta o inclinada, sin embargo, se debe ser precavido con esta afirmación por las diferencias comentadas durante el ensayo. En los casos de malla inclinada se produjo una flexión de la chapa de CFRP, sin embargo, tampoco podemos suponer que es debido a que la configuración de 45° presenta mayor resistencia y esto produzca la flexión del CFRP, ya que el caso del que se hablara más adelante, Malla Piedra 2, obtuvo una mayor resistencia y no se produjo ninguna flexión. Pero esta flexión si ayudo a reducir su resistencia a rasante ayudando a la creación de grietas.

En el caso de la probeta Malla inclinada Piedra Arena 2, la carga máxima detectada fue en el ensayo bis, es decir una vez el material ya se encontraba agrietado por la primera parte del ensayo. Tras descargar el gato hidráulico y colocarlo en su posición se realizó el ensayo bis donde se obtuvo una carga máxima más grande. Esto podría ser un indicador de que si no fuera por la flexión del material que se produjo durante los ensayos el conjunto habría resistido una carga mayor a la registrada durante el ensayo.

Por otra parte en la Figura 32, donde se comparan los especímenes con malla recta con los de malla inclinada, se observa una mejora en la ductilidad del material al poner la malla a 45° ya que se observa como soporta cargas ligeramente inferiores a la máxima a desplazamientos mayores. A pesar de esto, no se puede afirmar rotundamente debido a la peculiaridad de estos dos ensayos.

Por último, hablaremos sobre el espécimen Malla Piedra 2 el cual fue mucho más resistente que el resto llegando hasta 10.54 kN. Este fue el único espécimen con malla que no roto durante el ensayo, es decir presento un rasante perfecto. En el resto de especímenes a causa de la rotación se produce una fuerza normal al CFRP que ayuda a agrietar más rápidamente el material, por lo que podría ser que el rango real en un rasante perfecto se situara en el resultado de dicho espécimen. Podemos comprobar que la distribución de cortante medio es un 36.7% mayor que el segundo espécimen más resistente ($0.1197 - 0.0758 \text{ N / mm}^2$). Sin embargo, se trata de un caso aislado que no se ha repetido en el resto de ensayos por lo que no se pueden obtener conclusiones finales a partir de este caso.

Otro dato que se debe tener en cuenta es que se ha utilizado un gato hidráulico manualmente y no un actuador, por lo que la velocidad de desplazamiento no es constante durante el ensayo ni entre ellos. Esto también podría ser un motivo de la disparidad de resultados entre probetas similares.

Con todo esto se puede obtener la influencia de cada elemento de unión utilizado.

Material de unión	Ensayos comparados	Efecto
Piedra	Sin Refuerzo Interno - Piedra	Reduce la disparidad de la resistencia entre probetas al no depender tanto de la rugosidad del hormigonado
Malla de fibra de vidrio	Piedra - Malla Piedra	Soporta más carga máxima. Aumenta la ductilidad. 36% más de carga
Arena	Malla Piedra - Malla Piedra Arena	No se observan mejoras. 0 % , más de carga
Malla de fibra de vidrio a 45º	Malla Piedra y Malla Piedra Arena – Malla inclinada Piedra Arena	No se observa mejoras en la carga máxima. Posible mejora de la ductilidad (reevaluar con un ensayo donde la probeta no flecte tanto)

Tabla 4: Influencia de los diferentes materiales

6. Análisis de seguridad y salud

En este apartado se detallarán los EPIS utilizados durante el estudio según la actividad que se estuviera realizando.

- Desmoldeante alcohol polivinili
 - Riesgos: Líquido y vapores muy inflamables, tóxico en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación
 - Protección: Guantes de látex, bata, gafas, mascara
- Desmoldeante Zenex
 - Riesgos: Líquido y vapor muy inflamable, Irritación de la piel, tóxico en caso de ser ingerido o inhalado, puede causar somnolencia y mareos
 - Protección = Guantes de látex, bata, gafas, mascara
- Disolvente universal
 - Riesgos: Líquido y vapores muy inflamables, puede provocar daños en el sistema nervioso central tras explosiones prolongadas o por inhalación, nocivo en caso de ingestión o inhalación, irritación ocular grave, irritación cutánea, puede provocar somnolencia o vértigo
 - Protección = Guantes de látex, bata, gafas, mascara
- Alcohol
 - Riesgos: Líquido y vapores muy inflamables, tóxico en caso de ingestión, inhalación o contacto con la piel, daños en el nervio óptico y sistema nervioso central en caso de ingestión
 - Protección = Guantes de látex, bata, gafas, mascara
- Fibra de carbono
 - Riesgos: Puede causar irritación en la piel por el tipo de fibras que contiene la lámina (carbono, vidrio y/o aramida)
 - Protección = Guantes mecánicos, bata, gafas, mascara
- Resina epoxi y endurecedor
 - Riesgos: Evitar el contacto con los ojos o la piel, tóxico en caso de ingestión, inhalación o contacto con la piel
 - Protección: Guantes de látex, bata, gafas, mascara
- Cortar madera
 - Riesgos: Evitar el contacto de virutas en los ojos o inhalación.
 - Protección: Guantes mecánicos, bata, gafas, mascara

7. Presupuesto

Se ha realizado una estimación de los costes que ha requerido realizar este estudio.

La inversión para la realización del estudio ha sido facilitada por el Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras i por el Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM).

El coste total calculado es de 9 400 €.

En el documento 2, Presupuesto, se puede encontrar con más detalle.

8. Impacto ambiental

Este apartado se centrará en la energía consumida durante la realización del estudio, el tratamiento de los residuos no se encuentra en el alcance del trabajo: los residuos contaminantes, como la resina utilizada o el hormigón, que constituyen residuos de construcción sólidos han sido tratados por el personal de LITEM.

Se calculará las emisiones relacionada con la electricidad consumida por hora durante los ensayos y construcción de las probetas, teniendo en cuenta las horas de uso de cada una de las maquinarias utilizadas.

La energía consumida aproximada durante el estudio ha sido la siguiente:

Máquina	Consumo (kW)	Horas (h)	kW h
Radial, Hitachi G125R4 (S)	730	0.5	365
Caladora, Bosh PST 650	400	3.0	1200
Hormigonera, Bigmat 130	700	1.5	1050
Portátil	75	5.0	375
MX840A	13	5.0	65

Tabla 5: Energía consumida durante el estudio

Según la Generalitat de Catalunya, a la energía consumida en la península (datos de 2018) se le asocia unas emisiones de 321 g CO₂ / kWh [17].

De esta forma se estima que las emisiones durante el estudio han sido las siguientes:

Energía consumida total: 3055 kW h

Emisiones CO₂: 980.65 Kg

9. Conclusiones

Durante este trabajo se ha podido estudiar la resistencia a rasante del material compuesto propuesto formado por una chapa de CFRP con forma de omega y hormigón, además de estudiar las diferencias según el tipo de unión utilizado.

Se ha planteado un protocolo de fabricación de las probetas, así como la configuración del ensayo en base al tipo de probetas construidas.

Se ha realizado un análisis económico, de impacto ambiental y de seguridad y salud.

Se realizó con éxito todas las probetas propuestas y sus respectivos ensayos a partir de ellos se han extraído las siguientes conclusiones:

- Es necesario incluir material de unión o rugosidad para que los dos materiales trabajen conjuntamente

Como se pudo observar en el ensayo de la probeta Sin refuerzo interno 2 si no hay rugosidad, los dos materiales no actúan conjuntamente y el resultado obtenido es la resistencia por fricción entre los dos al deslizarse el bloque de hormigón. En cambio, al añadir rugosidad en el hormigonado o mediante el uso de piedras obtenemos una mejor unión y de esta forma los materiales trabajan conjuntamente llegando a soportar cargas de hasta 4.5 kN

- Incluir una malla de fibra de vidrio mejora la carga máxima que puede soportar en un 35%

Como se ha podido observar en los ensayos el rango de las probetas sin malla se encontraba entre 0 y 4.5 kN mientras que los especímenes con malla se sitúan entre 4.5 y 7 kN. En el caso de que el espécimen Malla Piedra 2 aguantó una carga máxima de 10.5 kN, un 55% más, sin embargo, como ya hemos mencionado no podemos asegurar este caso al no tener ningún otro ensayo con sus características.

- Incluir una malla de fibra de vidrio mejora la ductilidad del material

Se puede observar que en los especímenes sin malla al llegar a la carga máxima y realizar la rotura, los dos materiales dejan de trabajar conjuntamente y obtenemos como resultado la fricción entre dos materiales separados. Sin embargo, al incluir la malla el material sigue resistiendo cargas entre un 20 y un 25% menores que la máxima hasta producirse la rotura completa de la fibra de vidrio.

- No se observa diferencia entre incluir o no arena

A partir de los ensayos se puede observar que las diferencias que hay entre los especímenes de Malla Piedra y Malla Piedra Arena se pueden atribuir a defectos de construcción.

- No se observa diferencia en que la malla se encuentre paralela al CFRP o a 45º

Los especímenes con malla recta se encuentran en un rango de carga máxima similar a los de malla inclinada, sin embargo, en los ensayos de las probetas de malla inclinada se observó una flexión del CFRP que no estuvo presente en el resto de ensayos y esto podría haber reducido la carga máxima que puede soportar a rasante.

- La distribución de cortante medio en el contacto hormigón CFRP se encuentra en el rango de 0.0563 y 0.0758 N / mm² en los especímenes con malla

A partir de la carga máxima calculamos la distribución media de cortante máxima que soporto durante el ensayo

- Se ha realizado el trabajo de laboratorio sin incidentes gracias a las normas de seguridad
- La inversión requerida es mucho mayor a estudios teóricos, pero se encuentra dentro de los márgenes por el gasto extra de comprar los materiales y la utilización de la maquinaria del laboratorio
- Las emisiones de CO₂ son despreciables respecto las emisiones totales de una ciudad al día, pero cada kg cuenta. Es necesario aumentar el porcentaje de electricidad procedente de energías renovables para reducir la contaminación

Durante este proyecto se han completado satisfactoriamente los objetivos, sin embargo, se pueden realizar estudios con más profundidad para profundizar en la investigación siendo las siguientes recomendaciones:

- Caracterizar experimentalmente el CFRP
- Mejorar el hormigonado para obtener probetas más similares
- Realizar un mayor número de ensayos para corroborar los resultados obtenidos, centrándose en los especímenes Piedra, Malla Piedra y Malla inclinada Piedra
- Mejorar el protocolo de ensayo de manera que sea posible realizarlo a desplazamiento constante
- Mejorar el protocolo de ensayo para impedir que la probeta rota, y así obtener un rasante perfecto
- Realizar un estudio más realista sobre la distribución de cortante sin suponer un cortante medio, ya que realmente es mayor en las zonas más cercanas al lugar donde se aplica la carga

10. Bibliografía

- [1] M. A. Pérez, *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. Omnia Publisher SL, 2014.
- [2] S. Kumar, H. Doshi, M. Srinivasarao, J. O. Park, and D. A. Schiraldi, "Fibers from polypropylene / nano carbon ® ber composites," vol. 43, pp. 1701–1703, 2002.
- [3] "Fibra de Carbono - Materiales de construcción." [Online]. Available: <http://e-construir.com/fibra-carbono/>. [Accessed: 05-Jun-2019].
- [4] M. De Educación, A. E. Sileoni, L. María, R. Almandoz, and I. R. Díaz, "Materiales Compuestos."
- [5] J. Biagiotti, D. Puglia, and J. M. Kenny, "A Review on Natural Fibre-Based Composites — Part II," *J. Nat. Fibers*, vol. 1, no. 2, pp. 37–68, 2004.
- [6] C. Romea, "Estructuras mixtas: Acero - Hormigón, y sus ventajas en la construcción." [Online]. Available: <https://www.e-zigurat.com/blog/es/estructuras-mixtas-acero-hormigon/>. [Accessed: 05-Jun-2019].
- [7] J. V. A. Cabal, "OBRAS CON LOSAS MIXTAS SEGÚN EUROCÓDIGO Resumen," pp. 13–15, 2006.
- [8] "Estructuras Mixtas de Acero y Hormigón | Construpedia, enciclopedia construcción." [Online]. Available: https://www.construmatica.com/construpedia/Estructuras_Mixtas_de_Acero_y_Hormigón. [Accessed: 05-Jun-2019].
- [9] M. M. Rafi, A. Nadjai, F. Ali, and D. Talamona, "Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 277–285, 2008.
- [10] B. Wan, M. F. Petrou, and K. A. Harries, "The effect of the presence of water on the durability of bond between CFRP and concrete," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 25, no. 8, pp. 875–890, 2006.
- [11] M. Izat Hamakareem, "Design of FRP Axial Strengthening of RCC Columns -ACI 440.2R-08." [Online]. Available: <https://theconstructor.org/structural-engg/frp-rcc-column-axial-strengthening/16683/>. [Accessed: 05-Jun-2019].

- [12] T. Alkhrdaji, "STRUCTURE magazine | Strengthening of Concrete Structures Using FRP Composites," 2015. [Online]. Available: <https://www.structuremag.org/?p=8643>. [Accessed: 05-Jun-2019].
- [13] S. Tringali, "The partial reconstruction design of the Cathedral of Noto Part I : the social-economic impact on the town and on the territory and the cross-vaults , arches and dome system," *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, pp. 595–602, 2003.
- [14] H. A. Alhashmy and M. Nganbe, "Laminate squeeze casting of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites," *Mater. Des.*, vol. 67, pp. 154–158, 2015.
- [15] K. Shirvanimoghaddam, "Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties," 2016.
- [16] "INGENIERIA CIVIL: Módulo de elasticidad del Hormigón - método Para su determinación.," 2011. [Online]. Available: <https://www.ingenierocivilinfo.com/2011/06/modulo-de-elasticidad-del-hormigon.html?m=1>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [17] E. Por, P. D. E. La, O. Catalana, and D. E. L. Cambio, "Nota informativa sobre la metodología de estimación del mix eléctrico por la OCCC," p. 4, 2019.